

Des feuilles de plastiques colorées pour aborder la spectrophotométrie

Un spectrophotomètre économique et ludique

par **Jérôme RANDON**

Institut des sciences analytiques (ISA)

Université Claude Bernard Lyon 1 - 69100 Villeurbanne

randon@univ-lyon1.fr

LES CONCEPTS associés à la couleur des objets, à la synthèse additive et soustractive, ainsi qu'à la spectrophotométrie (absorbance, transmittance, loi de Beer-Lambert) sont présentés au lycée en classe de première. Si certaines manipulations utilisant des feuilles plastiques de couleurs peuvent être mobilisées dans une approche purement visuelle, aborder la spectroscopie d'absorption sur tout le domaine du spectre visible s'avère plus complexe en l'absence d'outil de représentation de spectre. Pour pallier ces difficultés, un spectrophotomètre à huit longueurs d'onde a été construit en assemblant une LED blanche, un capteur AS7341 et un microcontrôleur Arduino, et des feuilles plastiques de couleurs sont utilisées pour limiter les contraintes liées à la manipulation de solutions. Une fois l'instrument connecté à un PC, les informations transmises peuvent être visualisées sous forme d'un graphique dynamique dans un navigateur Internet et exploitées à l'aide de fonctionnalités variées. Pour moins de trente euros, on dispose alors d'un poste de travail qui peut être mobilisé pour différents types d'activités pédagogiques, depuis l'introduction à la spectroscopie jusqu'à la recherche de spectre dans une base de données.

INTRODUCTION

Le programme de physique-chimie de première générale fait référence à la couleur aussi bien dans le domaine de la physique que celui de la chimie (cf. annexe 1 et la référence [1]). En physique, il est fait appel aux modèles de la synthèse additive et de la synthèse soustractive et à l'effet de filtres colorés sur la couleur perçue. Autour de ce thème, de nombreuses questions et activités sont proposées sur la toile, par exemple sur le site Internet 123couleurs.fr [2], et peuvent être sources d'inspiration pour des séquences pédagogiques. À côté de ces activités qui utilisent des filtres colorés associés à des spots à LED avec une finalité orientée vers la physique, d'autres activités doivent pouvoir être proposées pour expliquer ou prévoir la couleur d'une espèce en solution à partir de son spectre UV-Visible, tel que formulé dans le programme (volet chimie). Mais disposer de spectrophotomètres, les faire utiliser par les élèves, et d'autre part manipuler des solutions, s'avère bien souvent difficile, que ce soit pour des raisons financières

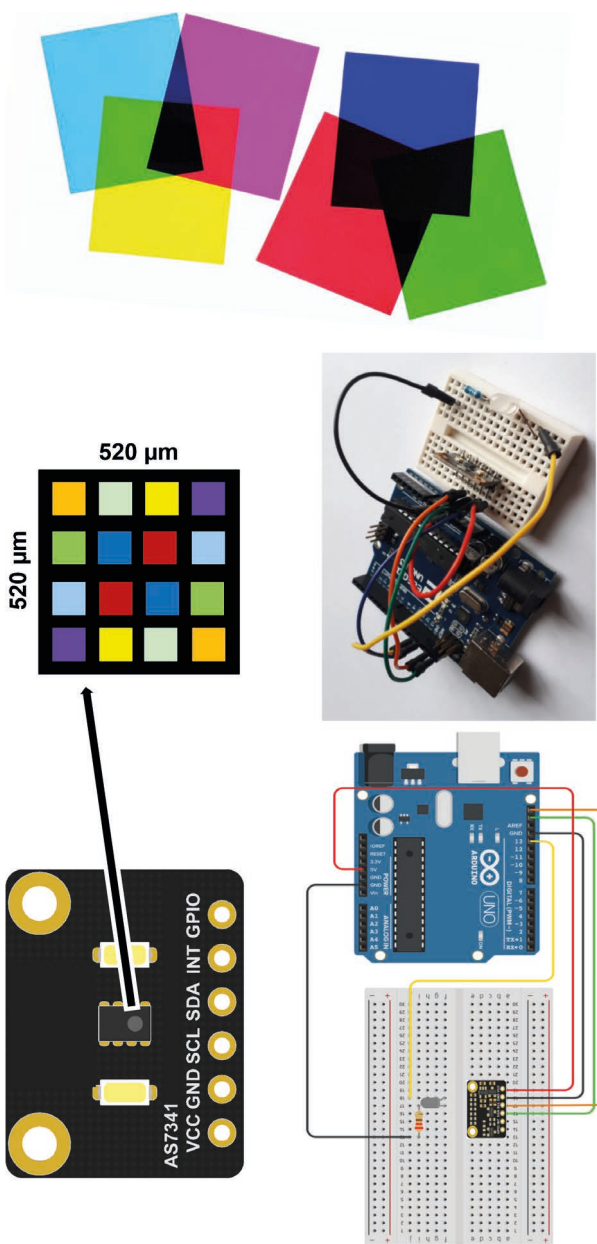


Figure 1 - Composant AS7341, schéma de câblage, photographie d'un montage, et quelques feuilles colorées.

ou, avec un groupe classe, pour des difficultés de mise en œuvre opérationnelles ou conceptuelles.

L'utilisation des microcontrôleurs peut s'avérer une approche efficace pour remédier à l'ensemble de ces problèmes structurels et organisationnels. En effet, en connectant une diode électroluminescente blanche et sa résistance associée à un microcontrôleur, il est possible de disposer d'une source de lumière blanche activable sur commande. D'autre part, il existe actuellement des capteurs de lumière à très faible coût tel que le composant AS7341 qui comporte huit canaux dans le domaine du spectre visible, centrés sur les longueurs d'onde 415, 445, 480, 515, 555, 590, 630 et 680 nm (cf. figure 1, page ci-contre). Connecter ce composant au microcontrôleur permet d'obtenir un signal proportionnel à l'irradiance sur chacun des canaux, et de là pouvoir remonter à une valeur de transmittance ou d'absorbance sur chacun de ces canaux. On peut donc disposer du matériel nécessaire pour élaborer un spectrophotomètre à un coût par poste inférieur à trente euros, avec un microcontrôleur qui peut être utilisé pour d'autres finalités.

Un autre obstacle à lever réside dans la manipulation de solutions alors que l'on utilise du matériel électronique. Une alternative minimisant les risques consiste à utiliser des feuilles plastiques colorées qui présentent une ou plusieurs espèces chimiques qui certes ne sont pas en solution aqueuse, mais diluées dans un polymère solide. Ces feuilles plastiques colorées (cf. annexe 2) que l'on peut retrouver auprès de nombreux fournisseurs sur Internet (dont 123couleurs.fr évoqué plus haut) sont une très fonctionnelle transposition du système liquide et peuvent être utilisées pour aborder les concepts associés à la spectrophotométrie.

Il reste un dernier obstacle, les codes informatiques nécessaires pour faire fonctionner le microcontrôleur et pour ensuite pouvoir visualiser les données sous une forme graphique. Ce n'est pas un souci, de tels codes sont mis à disposition de tous gratuitement sur le serveur⁽¹⁾.

Finalement, ce sera la scénarisation des séances pédagogiques qui sera à mettre en place, et quelques pistes sont proposées dans cet article.

1. DU SIGNAL DU CAPTEUR À L'ABSORBANCE

Si travailler sur l'élaboration d'un colorimètre peut être la finalité à part entière d'une séquence d'enseignement [3-7], l'objectif réside ici dans un câblage approprié des éléments et l'implémentation d'un programme adapté sur le microcontrôleur afin de se doter d'un outil au service de notre pédagogie. On peut retrouver le même

(1) <https://arduino-enseignement-chimie.univ-lyon1.fr/>

type d'approche sur plusieurs sites Internet [8-9] avec des interfaces et fonctionnalités variées.

Une LED blanche est connectée à une résistance de $220\ \Omega$ entre les broches 13 et GND de façon à pouvoir allumer la LED sur commande. Le composant AS7341 doit être alimenté (5 V sur la broche V_{CC} , GND sur la broche GND) et communiquer avec le microcontrôleur *via* le bus I2C (les broches SCL et SDA du composant sont à connecter sur les broches du même nom sur le microcontrôleur). Le montage présenté sur la figure 1 (cf. page précédente) est réalisé avec une plaque de prototypage, ce qui permettra aussi d'exploiter l'encoche de celle-ci pour positionner les feuilles plastiques verticalement entre la LED et le composant AS7341.

Le programme à implanter sur le microcontrôleur est basé sur l'algorithme présenté sur la figure 2 (cet algorithme est identique à celui utilisé pour élaborer un colorimètre basique avec une LED colorée et une photodiode comme détecteur). Le programme .ino est à télécharger sur le site (cf. note 1) onglet « Spectrophotomètre », et à téléverser à l'aide du logiciel dédié (*IDE Arduino*).

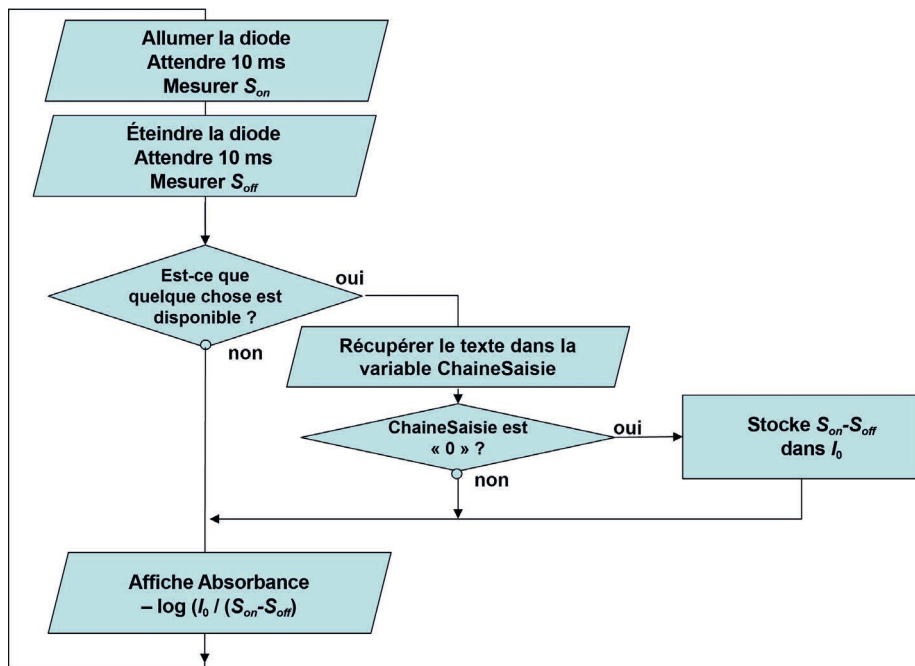


Figure 2 - Algorithme de fonctionnement du programme Arduino.

De façon à s'affranchir de la lumière ambiante, la LED blanche est successivement

allumée et éteinte et le signal sur chacun des capteurs du AS7341 est alors mémorisé dans les variables S_{on} et S_{off} . À chaque longueur d'onde, la différence $S_{on} - S_{off}$ est proportionnelle au flux lumineux en provenance de la LED, indépendamment de la lumière ambiante (S_{on} est associé au flux lumineux en provenance de la LED + la lumière ambiante ; S_{off} est associé au flux lumineux lié à la lumière ambiante uniquement). Sur commande de l'utilisateur (envoi de «0» *via* le port série, directement dans l'application Arduino ou par tout autre moyen), la différence $S_{on} - S_{off}$, normalement réalisée en l'absence de feuille plastique entre la LED et l'AS7341, est mémorisée et stockée dans la variable I_0 . Cette variable sera ensuite utilisée pour calculer l'absorbance lors du positionnement d'une feuille plastique entre la LED et l'AS7341. Pour faciliter l'usage par l'utilisateur, la mémorisation de I_0 s'effectue automatiquement trois secondes après le démarrage du programme. L'utilisateur peut aussi, à tout moment, forcer la mémorisation de I_0 par l'envoi de la commande «0». Autre petite option de type administrateur : l'envoi de la commande «B» permet d'accéder à toutes les valeurs des signaux S_{on} et S_{off} ce qui permet éventuellement de voir si les capteurs se trouvent en saturation (valeur max proche de 40 000) et dans ce cas d'ajuster le positionnement de la LED de façon à réduire l'intensité émise en direction des capteurs. Un nouvel envoi de la commande «B» stoppe ce mode de fonctionnement. Un protocole bien plus simple pour positionner correctement la diode est proposé en annexe 3.

Le microcontrôleur envoie donc régulièrement *via* le port série une chaîne de caractère constituée des huit valeurs d'absorbance (une pour chacun des canaux) séparées par une virgule. Cette chaîne de caractère peut dans un premier temps être visualisée sur le moniteur de l'application Arduino, directement après le téléversement du programme.

2. L'INTERFACE GRAPHIQUE

L'interface graphique (cf. figure 3, page ci-après) a été réalisée sous la forme d'une page Internet que l'on peut ouvrir dans un navigateur (Chrome, Opéra, Edge), le fichier HTML est à télécharger sur le site (cf. note 1). À l'heure actuelle, le programme n'est pas fonctionnel sur le système Android (peut-être quelqu'un sera à même de solutionner ce problème prochainement). Le code HTML/javascript a été généré en utilisant l'intelligence artificielle ChatGPT dans une démarche progressive visant à mettre en place la communication de la page avec le microcontrôleur, puis récupérer la chaîne de caractère, extraire chacune des huit valeurs d'absorbance et représenter les données sous forme graphique [10].

Outre les deux boutons pour connecter/déconnecter le microcontrôleur, un bouton a été introduit pour pouvoir faire le «0» du spectrophotomètre, et des boutons radio permettent de sélectionner le mode de représentation Absorbance ou Transmittance.

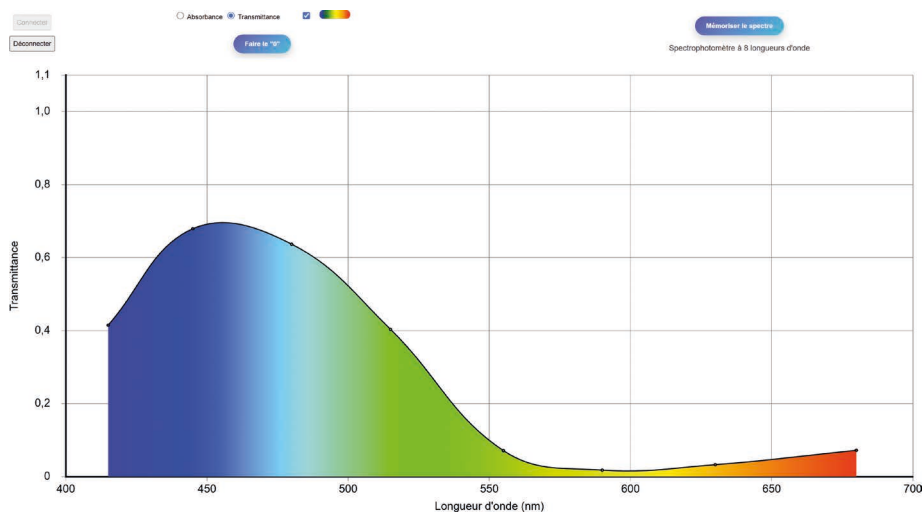


Figure 3 - Interface graphique du spectrophotomètre Arduino-AS7341.

Une case à cocher permet d'activer/désactiver l'affichage des couleurs associées sous la courbe du spectre. Un bouton « Mémoriser le spectre » permet de conserver sur la figure la trace d'un spectre enregistré. Dès qu'un spectre a été mémorisé, un calcul de score de similarité est réalisé entre le spectre mémorisé et le spectre en cours de mesure.

Le score utilisé ici est la similarité cosinus [11] qui caractérise la colinéarité de deux vecteurs à n dimensions en déterminant le cosinus de leur angle (ici, chaque spectre correspond à un vecteur de dimension 8). Pour deux vecteurs **A** et **B**, le cosinus de leur angle θ s'obtient en prenant leur produit scalaire des deux vecteurs divisé par le produit de leurs normes :

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{\|\mathbf{A}\| \|\mathbf{B}\|}.$$

La valeur de $\cos \theta$ est comprise dans l'intervalle $[-1, 1]$. La valeur de -1 indique des vecteurs opposés, la valeur de 0 des vecteurs indépendants (orthogonaux) et la valeur de 1 des vecteurs colinéaires de coefficient positif. Les valeurs intermédiaires permettent d'évaluer le degré de similarité. Ce type de calcul est par exemple utilisé par des logiciels de spectrométrie de masse pour évaluer la similarité entre un spectre de masse expérimental et les spectres enregistrés en bibliothèque (base de données de spectres MS, IR et UV consultable sur le site NIST [12]).

En ajoutant à la fin de l'URL de la page Internet « ?outil=BD » (par exemple pour la version 1.03 : AS7341Arduino1.03.html?outil=BD), on rend possible la recherche de similarité de spectre dans une base de données qui est positionnée dans le fichier DataBase.js. Cette base de données a été construite à partir de spectres expérimentaux.

taux obtenus avec plusieurs jeux de feuilles plastiques achetées chez 123couleurs et sur des sites de vente en ligne. Chaque ligne de la base de données du fichier DataBase.js (cf. annexe 4) correspond à un type de feuille et contient les huit valeurs d'absorbances mesurées, le nom de la feuille et un code RVB permettant de faire apparaître la couleur de la feuille. Cette base de données peut être modifiée par tout utilisateur en éditant le fichier DataBase.js avec un simple programme du type *Notepad.exe*.

Dernière fonctionnalité, une case à cocher située en dessous du graphique permet d'afficher la chaîne de caractère reçue. Cela permet d'accéder aux valeurs numériques de l'absorbance à chacune des longueurs d'onde de mesure, valeurs que l'on peut aussi voir affichées en survolant les points sur le graphique.

3. QUELQUES USAGES

3.1. La relation entre la couleur perçue et le spectre en transmittance

À l'ouverture de la page HTML, après la connexion au microcontrôleur, on retrouve, sur la figure en mode transmittance (représentation graphique « Transmittance en fonction de la longueur d'onde »), la couleur associée à chaque longueur d'onde dans le domaine visible, entre 400 et 700 nm, du violet-bleu au rouge.

En parallèle, un montage tel que celui présenté sur la figure 4 peut être éventuellement réalisé avec un autre microcontrôleur pour aider à faire le lien entre les

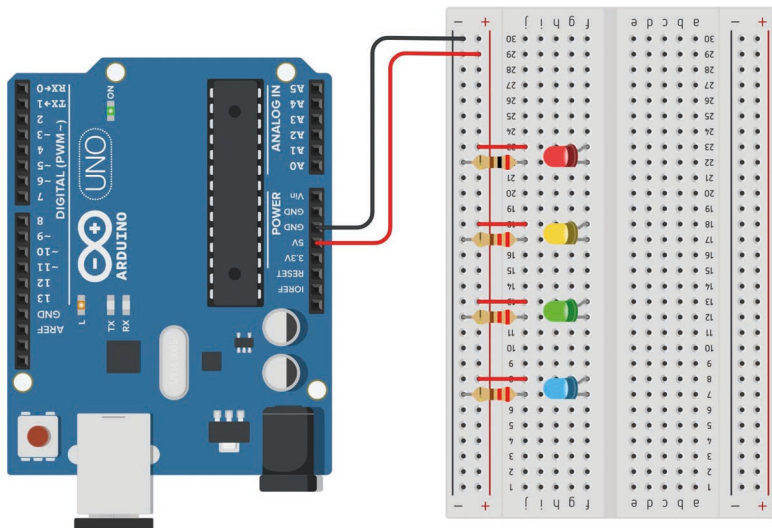
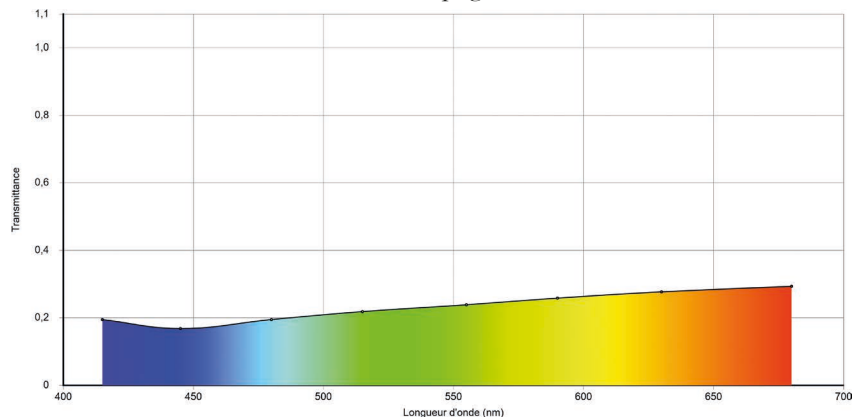


Figure 4 - Montage avec quatre LED bleue, verte, jaune et rouge, et quatre résistances de 220 W. Le microcontrôleur ne sert que de source d'alimentation 5 V/GND, aucun programme n'est nécessaire.

observations effectuées à partir d'un ensemble de diodes émettant chacune dans une plage de longueurs d'onde données et la représentation graphique « Transmittance en fonction de la longueur d'onde » affichée à l'écran.

Qu'observe-t-on lors de l'introduction de feuilles de couleur marron (une ou deux feuilles) entre la LED et le capteur ? ou entre les quatre LED de couleurs et mon œil ?

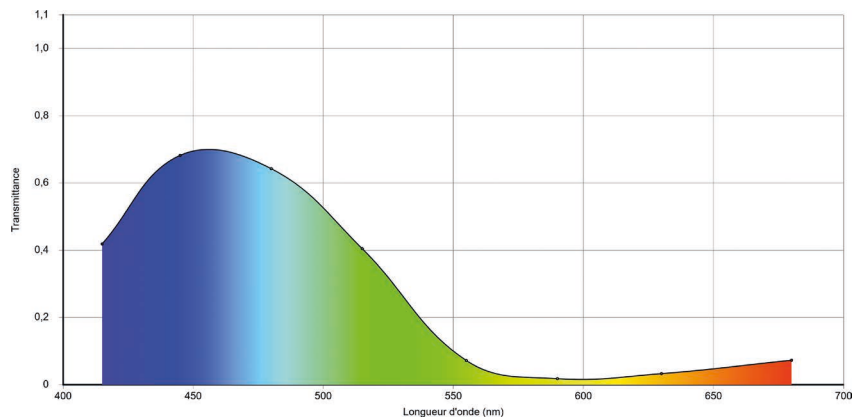
Avec une feuille de couleur marron, l'irradiance perçue par mon œil diminue pour toutes les LED, la valeur de la transmittance diminue sur toute la plage 400-700 nm.



Le même questionnement peut être proposé avec des feuilles bleue et rouge.

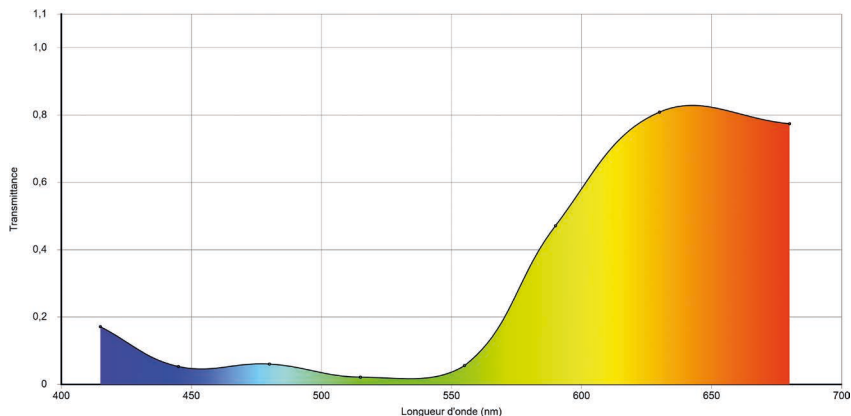
Lorsque j'insère une feuille de couleur bleue, l'irradiance de la LED rouge perçue par mon œil diminue, celle de la LED jaune aussi.

Sur la représentation graphique issue des données du capteur (ci-dessous), la transmittance diminue beaucoup entre 550 et 680 nm et beaucoup moins dans le reste du spectre.



Lorsque j'insère une feuille de couleur rouge, l'irradiance de la LED bleue perçue par mon œil diminue, celle de la LED verte aussi.

Sur la représentation graphique issue des données du capteur (ci-dessous), la transmittance diminue beaucoup entre 400 et 550 nm et beaucoup moins dans le reste du spectre.



Et ce questionnement peut se répéter avec toutes les couleurs de feuille, ce qui ne manquera pas de questionner les perceptions de chacun...

3.2. Le lien transmittance - absorbance

Le bouton à option ☒ Absorbance ☐ Transmittance permet de faire basculer le graphique entre les deux modes de représentation :


- ◆ « Absorbance en fonction de la longueur d'onde » ;
- ◆ « Transmittance en fonction de la longueur d'onde » : ce qui est transmis est peu absorbé, et inversement.

3.3. Un petit jeu : retrouver une feuille correspondant à un spectre

Le bouton « Mémoriser le spectre » permet de conserver sur l'écran la trace du spectre. Activer cette option permet ensuite de faire des comparaisons de spectres lors de l'insertion d'une nouvelle feuille.

Cette option permet d'imaginer différents scénarios d'activités pédagogiques présentant un caractère ludique. Par exemple, il est possible de proposer un scénario dans lequel un élève choisit une feuille de couleur, la positionne dans l'instrument, mémorise le spectre en transmittance à l'aide du bouton, et retire la feuille. Un autre élève, qui n'a pas connaissance de la feuille choisie par le premier élève, doit retrouver

la feuille utilisée en sélectionnant puis insérant une feuille parmi celles présentes sur la table, et peut évaluer la similarité entre les deux spectres (un score est affiché pour quantifier la similarité).

Le contexte du jeu peut aussi être plus ou moins complexifié, en utilisant un spectre en absorbance, et/ou en désactivant l'affichage des couleurs avec la case à cocher ☐ .

La configuration de jeu peut être proposée sous la forme de challenge individuel, entre équipes, avec plusieurs spectrophotomètres, en comptant le nombre d'essais, le cumul de point obtenu avec les scores de similarités, en variant le jeu de feuilles...

3.4. Aborder la loi de Beer-Lambert

3.4.1. Effet de la longueur du trajet optique

En utilisant des feuilles ne présentant pas une absorbance très importante (par exemple une feuille rose pâle conduisant à une absorbance égale à 0,282 à 515 nm, spectre mémorisé sur la figure 5A, page ci-contre), augmenter le nombre de feuilles permet de faire varier l'absorbance proportionnellement au nombre de feuilles (0,567 pour deux feuilles, 0,837 pour trois feuilles à 515 nm). Cette relation de proportionnalité est illustrée sur la figure 5B (cf. page ci-contre) et ceci pour toutes les longueurs d'onde (le graphe n'est pas construit automatiquement, mais résulte des données successivement acquises par l'utilisateur). On pourrait aussi illustrer l'écart à la linéarité qui apparaîtra avec un nombre de feuilles plus important, montrant aussi la limite de l'instrumentation. Prendre conscience qu'une limite existe sur tout instrument (les instruments commerciaux aussi) est important pour garantir la qualité des résultats.

3.4.2. Effet de la concentration

Utiliser des feuilles de même couleur, mais plus ou moins vertes par exemple permet de montrer que les spectres de transmission sont globalement très similaires, mais avec une quantité de lumière transmise dans tout le spectre beaucoup moins importante pour la feuille apparaissant la plus sombre.

3.5. Une recherche en base de données pour identifier la feuille

Trier des matières plastiques en vue de l'identification de fraude ou de recyclage peut être un challenge particulièrement motivant pour des élèves. Il est possible de proposer une fonction de recherche en base de données avec l'ajout de « ?outil=BD » dans l'URL de la page Internet utilisé pour l'interface graphique.

Si on active la case à cocher correspondante, le programme recherche en continu la plus grande similarité entre le spectre affiché et les spectres présents dans sa base de

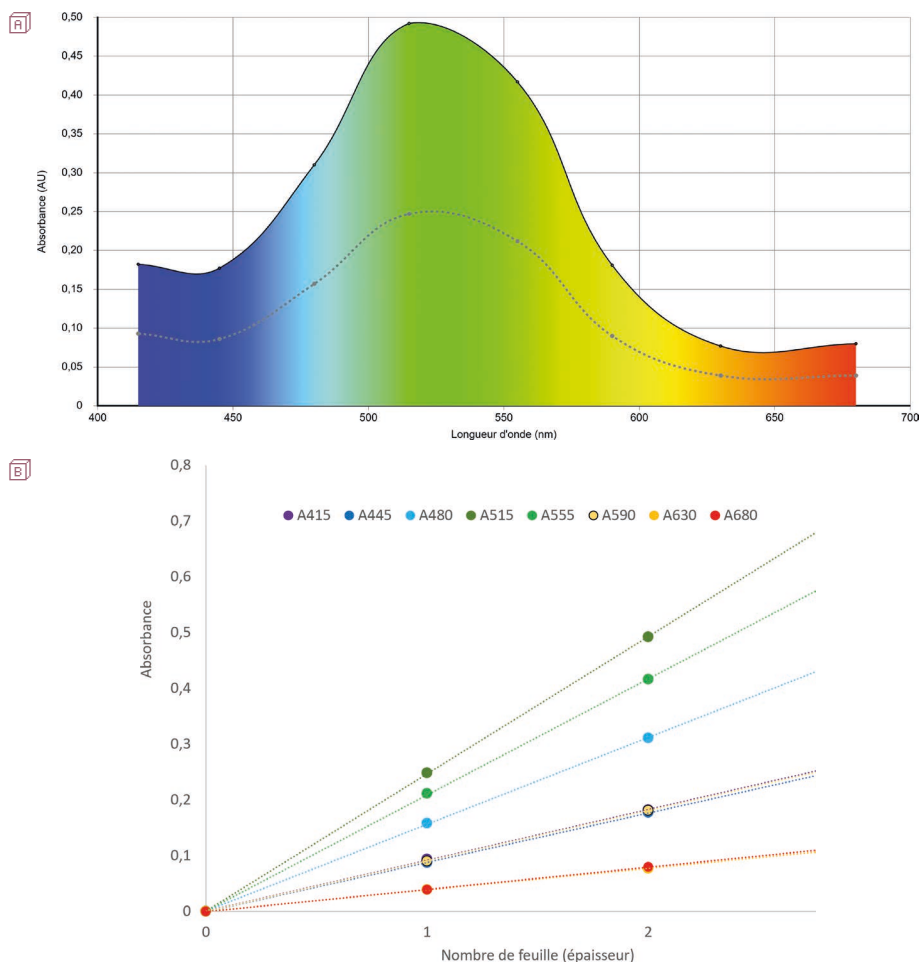
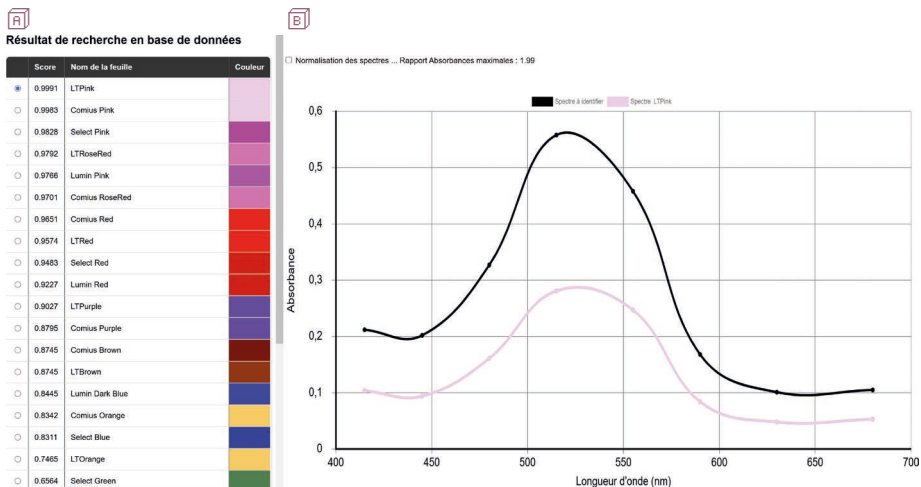


Figure 5 - A) Spectre de feuilles colorées en rose. En pointillés spectre mémorisé avec une feuille rose. En trait plein et couleurs spectre obtenu avec deux feuilles roses. **B)** Absorbance en fonction du nombre de feuilles pour toutes les longueurs d'onde de mesure (courbes de tendances associées).

données. Il affiche alors la feuille la plus probable et le score de similarité. Il est assez intéressant de constater que si l'on reste bien dans la zone de réponse linéaire du spectrophotomètre, utiliser une ou deux feuilles conduit à une identification correcte de la feuille (en l'occurrence des feuilles). Dans l'exemple présenté sur la figure 5, les deux feuilles *LTPink* sont bien reconnues.

Si l'on clique sur le bouton « Recherche détaillée », une nouvelle fenêtre s'ouvre, organisée en deux zones. Dans la partie droite de l'écran (cf. figure 6B, page ci-après),

le spectre à chercher est représenté en noir. Sur la gauche de l'écran (cf. figure 6A), un tableau contient la totalité des feuilles de la base de données, ordonnées en fonction du score de ressemblance avec le spectre à identifier. Dans le tableau, il est alors possible de sélectionner n'importe quelle feuille et de tracer le spectre correspondant pour apprécier visuellement la similarité des spectres.



Comme le cosin score utilisé pour apprécier la similarité des spectres est basé sur la colinéarité des deux vecteurs (spectre à identifier et spectre de la base de données), deux spectres peuvent se ressembler même si les valeurs absolues des absorbances pour chaque longueur d'onde sont différentes. Un tel cas traduit l'existence d'une relation de proportionnalité entre les données, proportionnalité que l'on peut mettre en évidence en traçant des spectres normalisés à la plus grande valeur d'absorbance du spectre.

La base de données qui est fournie en téléchargement ne contient probablement pas les feuilles qui sont utilisées par la classe. Mais rien n'empêche de travailler tous ensemble pour construire la propre base de données de la classe, à partir pourquoi pas de feuilles plastiques apportées par les élèves.

On pourrait aussi envisager de construire une base de données en limitant les catégories, c'est-à-dire donner par exemple à toutes les feuilles vertes dont on saisit les caractéristiques spectrales dans la base de données, le nom « Feuille verte » indépendamment du fournisseur ou de l'intensité de la couleur. L'objectif serait alors de faire reconnaître uniquement la couleur de la feuille.

CONCLUSION

La construction d'un spectrophotomètre peut se faire avec un coût très faible par poste, ce qui permet d'envisager la création de nombreux postes de travail. Le montage peut être réalisé par l'équipe de formation, ou pourrait aussi être proposé à des élèves dans le cadre d'activités pédagogiques orientées sciences de l'ingénieur. Une fois en place, l'outil peut être mobilisé pour aborder de nombreux concepts autour de la spectrophotométrie en utilisant des feuilles plastiques, ce qui réduit considérablement les difficultés d'organisation de la classe liées habituellement à la manipulation de solutions.

Volontairement, l'interface utilisée a des fonctionnalités limitées : connecter le colorimètre Arduino, faire le zéro, basculer le graphique absorbance/transmittance, mémoriser un spectre, afficher un score de similarité, et si l'option est activée rechercher des similarités dans une base de données. Rien n'a été implémenté pour réaliser directement les courbes d'étalonnage et retrouver une concentration, ou faire un suivi cinétique. Le choix a été fait de laisser à l'élève le soin de traiter lui-même les données en fonction des objectifs poursuivis (mais d'autres pages pourraient bien sûr être créées à cet effet).

Seuls des calculs de score de similarité et la recherche en base de données ont été implémentés car ils nécessitent un peu de traitement mathématique non accessible en classe de première (même si le produit scalaire et la norme d'un vecteur sont au programme, mais seulement dans le plan, en dimension 2). Présenter un tableau de score de similarité dès le lycée apparaît intéressant aujourd'hui. En effet, ceci permet d'introduire un volet Intelligence artificielle sur des données acquises par les élèves eux-mêmes, avec en amont la possibilité de construction de la base de données par le groupe classe. Si l'on souhaite aller beaucoup plus loin et aborder l'aspect analyse de données, l'approche par la spectroscopie sur des feuilles plastiques peut aussi servir d'élément de base [13], mais là on sort clairement du programme du lycée.

Après avoir manipulé des feuilles plastiques, le passage à des solutions en utilisant des cuves pour effectuer des mesures (avec pourquoi pas un petit support de cuve en impression 3D qui s'emboîte dans la rainure de la plaque de prototypage) sera le prolongement naturel des activités proposées aux élèves. Il conduira alors à la mobilisation conjointe des notions de spectrophotométrie et de concentration et quantité de matière.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] Éduscol, « Niveau lycée : programmes et ressources en physique-chimie - voie GT ». Disponible à l'adresse : <https://eduscol.education.fr/1648/programmes-et-ressources-en-physique-chimie-voie-gt> page consultée le 14 mai 2025.

- [12] WebBook de chimie NIST, « Base de données standard de référence NIST », n° 69. Disponible à l'adresse : <https://webbook.nist.gov/chemistry/> page consultée le 14 mai 2025.
- [13] J. Randon, Y. Clément et P. Lanteri, « Une situation pédagogique sur microcontrôleur pour faire émerger les besoins en analyse de données : le tri des matières plastiques », *L'Act. Chim.*, n° 487, p. 37-45, septembre 2023.

Annexe 1

Extrait du programme de physique-chimie de première générale

1. SUIVI DE L'ÉVOLUTION D'UN SYSTÈME, SIÈGE D'UNE TRANSFORMATION

A) Détermination de la composition du système initial à l'aide de grandeurs physiques

◆ Absorbance, spectre d'absorption, couleur d'une espèce en solution, loi de Beer-Lambert	<ul style="list-style-type: none">◆ Expliquer ou prévoir la couleur d'une espèce en solution à partir de son spectre UV-Visible.◆ Déterminer la concentration d'un soluté à partir de données expérimentales relatives à l'absorbance de solutions de concentrations connues.◆ Proposer et mettre en œuvre un protocole pour réaliser une gamme étalon et déterminer la concentration d'une espèce colorée en solution par des mesures d'absorbance.◆ Tester les limites d'utilisation du protocole.
---	---

2. LA LUMIÈRE : IMAGES ET COULEURS, MODÈLES ONDULATOIRE ET PARTICULAIRE

A) Images et couleurs

<ul style="list-style-type: none">◆ Couleur blanche, couleurs complémentaires.◆ Couleur des objets.◆ Synthèse additive, synthèse soustractive.◆ Absorption, diffusion, transmission.◆ Vision des couleurs et trichromie.	<ul style="list-style-type: none">◆ Choisir le modèle de la synthèse additive ou celui de la synthèse soustractive selon la situation à interpréter.◆ Interpréter la couleur perçue d'un objet à partir de celle de la lumière incidente ainsi que des phénomènes d'absorption, de diffusion et de transmission.◆ Prévoir le résultat de la superposition de lumières colorées et l'effet d'un ou plusieurs filtres colorés sur une lumière incidente.◆ Illustrer les notions de synthèse additive, de synthèse soustractive et de couleur des objets.
--	---

Annexe 2

*Feuilles plastiques en provenance de 123couleurs (Lumin et Select)
et de sites de vente en ligne*

Lumin



Select



Comius



LTZGO



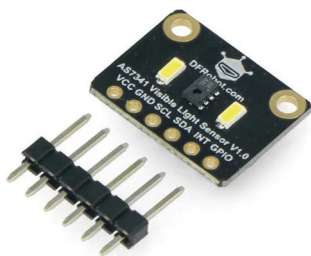
Pochettes plastiques



Annexe 3

Montage du spectrophotomètre

Si le composant AS7341 est équipé de pattes de connexion soudées, avec un angle de 90°, le montage du spectrophotomètre sur une plaque de prototypage sera grandement facilité.



Le seul paramètre à régler dans le montage réside dans la position de la LED blanche de façon à ne pas saturer le détecteur. Pour cela, on pourra utiliser la procédure suivante :

- ◆ connecter le microcontrôleur et ouvrir la page Internet du programme ;
- ◆ incliner la LED de façon à envoyer le maximum de lumière vers le composant AS7341 ;
- ◆ faire le zéro de l'instrument (transmittance à 1), le capteur est alors en saturation ;
- ◆ incliner la LED, le plus facile consiste à la diriger vers le haut, de façon à faire diminuer la transmittance sur tous les canaux en dessous de 0,9 ; on est alors certains que les capteurs ne sont pas en saturation ;
- ◆ faire le zéro de l'instrument.

Annexe 4

Structure de la base de données DataBase.js

L'extrait du fichier ci-dessous est téléchargeable sur le site⁽²⁾.

```
// Base de données par défaut
database8 = [
  [0.300,0.175,0.156,0.189,0.501,1.058,1.172,0.858,"Lumin Cyan",0,176,238],
  [0.433,0.253,0.491,1.179,1.734,1.477,1.144,0.620,"Lumin Dark Blue",63,30,228],
  [0.921,1.732,1.323,1.538,1.315,0.421,0.133,0.144, "Lumin Red",222,11,0],
  [0.933,1.407,0.616,0.306,0.497,0.930,1.156,0.931,"Lumin Green",49,156,16],
  [0.351,0.305,0.516,1.107,1.242,0.408,0.112,0.112,"Lumin Pink",216,72,196],
  [0.455,1.433,0.434,0.068,0.050,0.048,0.051,0.070,"Lumin Yellow",235,246,12],
  [0.657,0.409,0.702,1.647,2.149,2.052,1.804,1.038,"Select Blue",36,36,198],
  [0.351,0.238,0.184,0.183,0.516,1.133,1.236,0.913,"Select Cyan",0,176,238],
  [1.104,1.919,1.577,1.903,1.838,0.790,0.262,0.207, "Select Red",222,11,0],
  [1.386,2.429,1.208,0.550,0.953,1.995,1.947,1.660,"Select Green",65,127,80],
  [0.453,0.427,0.704,1.421,1.492,0.537,0.119,0.120,"Select Pink",203,57,168],
  [0.487,1.454,0.614,0.148,0.071,0.059,0.065,0.082,"Select Yellow",235,246,12]
];
```



Jérôme RANDON

Professeur des universités

Institut des sciences analytiques (ISA)

Université Claude Bernard Lyon 1

Villeurbanne (Rhône)

(2) <https://arduino-enseignement-chimie.univ-lyon1.fr/>